

• 综 述 •

## 电荷耦合器件损伤进程中猫眼回波的特性研究

张明鑫, 聂劲松, 孙可, 卞进田, 韩敏, 张磊

(国防科技大学 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 合肥 230037)

**摘要:** 首先介绍了基于猫眼效应的激光主动探测方法的发展历程, 分析了离焦量、探测距离、大气湍流等因素对猫眼回波的影响; 然后介绍了激光损伤 CCD 的研究过程及研究现状, 分析了激光损伤 CCD 的机理及效果; 最后介绍了利用猫眼效应探测 CCD 被损伤程度的方法, 并指出了此方法的发展方向。

**关键词:** 猫眼效应; 激光损伤; CCD

中图分类号: TN249

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2017)-06-0006-09

## Research on Characteristics of Cat Eye Echo in Damage Process of Charge-coupled Device

ZHANG Ming-xin, NIE Jin-song, SUN Ke, BIAN Jin-tian, HAN Min, ZHANG Lei

(State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China)

**Abstract:** At first, the development process of the laser active detection method based on the cat's eye effect is introduced and the influence of the factors including the focus-deviations, detection distance and atmospheric turbulence on the cat's eye echo is analyzed. And then, the research process and status of laser damage charge-coupled device (CCD) are introduced and the mechanism and effect of laser damage CCD are analyzed. At last, the method of detecting the damage degree of CCD by cat's eye effect is introduced, and the developing direction of the method is proposed.

**Key words:** cat eye effect; laser damage; charge-coupled device (CCD)

光电成像系统的核心是 CCD, 但 CCD 较为脆弱, 极易受到激光辐照的干扰甚至破坏, 以致不能正常工作。由于激光损伤方式多样, 攻击方式未知, 对 CCD 损伤程度的探测十分重要。当 CCD 处于工作状态时, 光学系统将目标的辐射、散射信号聚集到一个传感器上, 再由光电传感器处理光信息, 在这一过程中会有一部分光信号反射回来, 因此可以运用主动发射激光对光电成像设备进行探测, 这就是基于“猫眼效应”的激光主动探测方法。这种方法对 CCD 的损伤状态进行实时探测具有重要

意义。

### 1 “猫眼效应”的原理机理

大多数光电系统在其焦平面上都具有反射或部分反射元件, 如调制托盘、光电探测器的光敏区域、反射晶体等<sup>[1]</sup>。这些光电系统包括光学观测和准直系统、光电跟踪系统、光电搜索系统、光电消防系统和光电测距系统。当强光照射到光电系统上时, 由于其光学结构的限制, 该光电系统会产生一

收稿日期: 2017-11-08

作者简介: 张明鑫(1994-), 男, 安徽合肥人, 硕士研究生, 主要从事激光损伤方面的研究; 聂劲松(1970-), 男, 研究员级高级工程师, 博士研究生导师, 主要从事光电对抗技术方面的研究; 孙可(1982-), 男, 助理研究员, 主要从事光电对抗技术方面的研究; 卞进田(1979-), 男, 湖南人, 主要从事非线性频率变换技术研究; 韩敏(1993-), 男, 安徽人, 主要从事光电对抗技术方面的研究; 张磊(1984-), 男, 安徽人, 主要从事光电对抗技术方面的研究。

反射回波束。回波束方向与入射光波方向相反,回波功率比普通漫反射功率大2~4个数量级。这就是光学窗口的“猫眼效应”,而这些光电系统就是“猫眼目标”。因此,可以利用主动发射激光对光电成像装备实施探测,这就是基于猫眼效应的激光主动探测方法<sup>[1-5]</sup>。“猫眼效应”在光电系统,光电雷达,自由空间通信等领域拥有广阔的前景<sup>[6-12]</sup>。从几何光学的角度来研究猫眼回波的传播特性和能量以及这些研究成果的运用是当前研究的主要方面。目前已研究出如下成果:激光主动探测系统,后向反射器,光通信和目标识别系统等<sup>[13-15]</sup>。

猫的眼睛在夜晚受到光照射时会显得很亮,这是因为当光线经过猫眼的瞳孔聚焦到视网膜上时,部分光可以按原路径反射回来,这时猫眼就显得很亮。“猫眼”目标可以认为是由一个薄透镜和一个反射面组合而成的<sup>[16]</sup>。根据在“猫眼”目标中光束的传播路径,“猫眼”目标是按照反射面严格对称的,形成一个 $4f$ 系统<sup>[17]</sup>。相应的“猫眼”目标模型如图1所示。

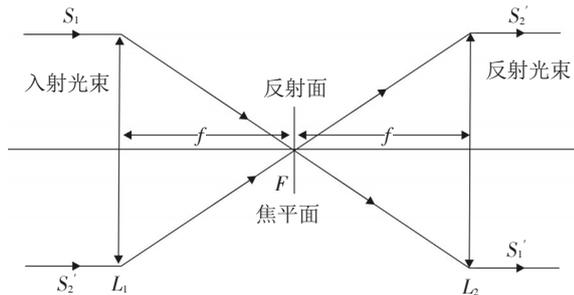


图1 “猫眼”目标的等效模型

如图所示,当远入射激光进入透镜 $L_1$ 的视场时,经透镜聚焦汇聚到焦面处,被反射平面反射后沿入射光方向出射<sup>[18]</sup>。

## 2 “猫眼回波”特性分析

光电成像是典型的猫眼光学系统,其回波图像对焦平面反射物的变化非常敏感,因此可以利用猫眼回波图像的变化分辨出器件微观损伤状况,便于更加细致的研究激光对探测器的损伤原理。所以,对猫眼回波图像的分析显得尤为重要。

### 2.1 “猫眼效应”用于激光探测的可行性

国内许多专家学者投入大量精力研究“猫眼效应”的应用。卿光弼在1995年论述了光学系统中存

在的“猫眼效应”物理模型,并验证了“猫眼效应”运用于实际的可行性<sup>[25]</sup>。随后,在2003年,葛成良在卿光弼的模型基础上加以改进,得出结论:利用“猫眼效应”进行远距离目标探测可以提高发现目标的概率<sup>[26]</sup>。在2005年,谷锁林通过仿真计算利用Nd:YAG激光器探测无人侦察机,得出要探测10 km处的目标需要15.2 W的功率,15 km需要75.5 W,20 km需要236.6 W,而30 km处需要1 200 W。因此利用激光器探测空中无人侦察机是可行的<sup>[27]</sup>。在2007年,邵立使用输出功率为5 mW的He-Ne激光平行入射到实验平台,经凸透镜传输到硅片表面,测得此时回波最大功率为19.4  $\mu$ W,“猫眼效应”反射率为5.87%。然后将硅片替换为漫反射板,得到“猫眼效应”反射率为1.13%。实验表明,当利用激光进行主动探测时,即使目标是漫反射面也会产生比较明显的“猫眼效应”,然后他利用“猫眼效应”对光学卫星的位置进行了定位<sup>[28]</sup>。2010年,胡琳通过分析CCD像元的尺寸和暗电流的大小侧面印证了运用“猫眼回波”探测CCD损伤程度的可行性。2011年,周斌推算出“猫眼”目标回波与漫反射小目标回波的功率比为 $6 \times 10^4$ ,并实际探测了300 m和2 500 m距离上“猫眼”目标的探测图样,如图2、图3所示。

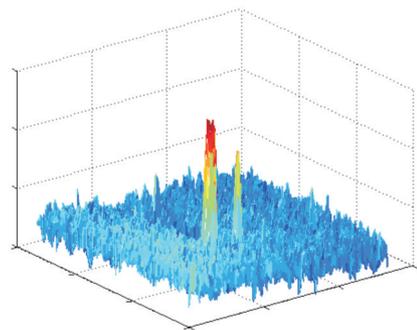


图2 300 m距离上“猫眼”目标探测图像

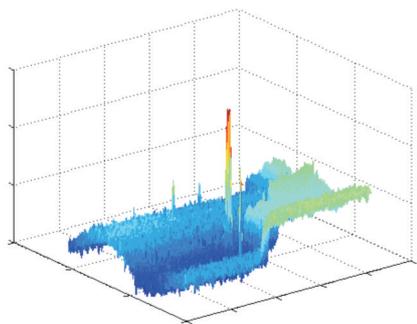


图3 2 500 m距离上“猫眼”目标探测图像

2016年,高润提出了离线损伤判别法和在线损伤判别法用于测量损伤阈值。综上所述,“猫眼效应”可以应用于激光探测技术<sup>[29]</sup>。

## 2.2 关于“猫眼回波”功率的研究

对“猫眼回波”功率的影响因素的研究有很多。邵立<sup>[28]</sup>利用小功率He-Ne激光器研究了位于焦平面上的硅片离焦时回波功率的变化以及激光斜入射角度不同的回波功率差异,验证了光学法<sup>[30-31]</sup>的正确性。在2009年,张博从理论上推导出了正负离焦量和激光发散角对猫眼回波功率影响的表达式,建立了“猫眼效应”的等效模型,如图4、图5、图6所示。并运用仿真分析证明了理论推导的正确性,如图7、图8所示。

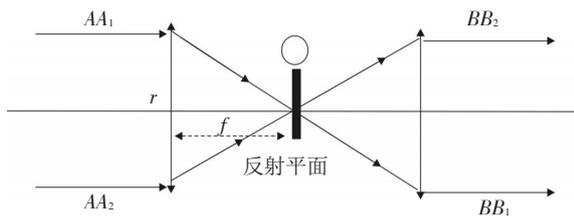


图4 “猫眼效应”等效模型

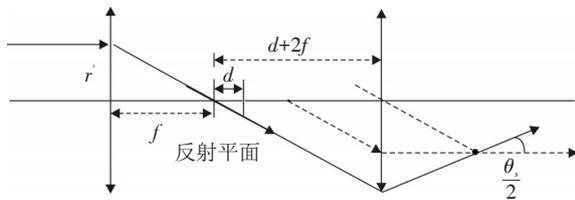


图5 正离焦条件下“猫眼效应”等效模型

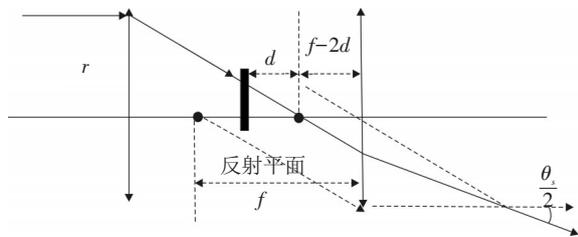


图6 负离焦条件下“猫眼效应”等效模型

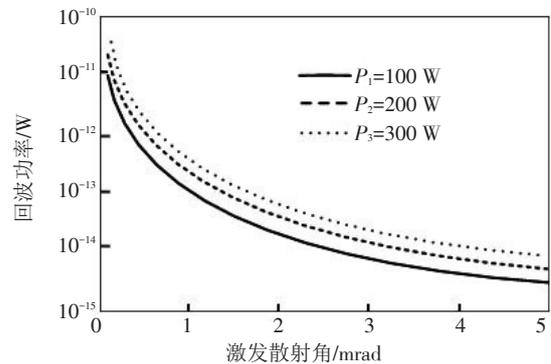


图7 激光发散角与回波功率的关系曲线

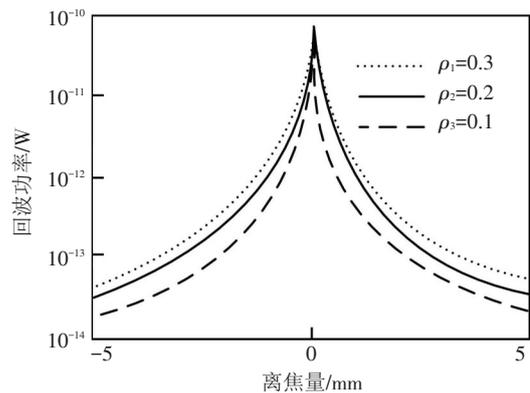


图8 离焦量与回波功率的关系曲线

他认为,“猫眼”目标的回波功率的影响因素包括发射激光参数(如激光发散角、发射功率)、大气传输特性(如大气能见度、探测距离)和“猫眼”目标结构参数(反射面离焦,反射面反射率),其中激光发散角与回波功率成反比,激光发射功率与回波功率成正比,离焦量的平方与激光回波功率成反比<sup>[32]</sup>。

2012年,孙华燕理论推导出目标光学镜头的有效反射面积公式以及“猫眼”回波传输的最大距离公式,分析出反射光功率由目标口径、焦距、离焦量以及反射光的发散角和探测激光入射角决定;“猫眼回波”最大传输距离由系统自身性能、外部探测结构以及目标参数决定<sup>[16]</sup>。同年,和婷提出一个理论创新:将回波波束看做是“目标”发出的一束球面波,在离焦情况下,“猫眼”回波波束可以看做从目标处发出的一束锥形球面波。由此分析出离焦量与回波功率成反比,而微弱正离焦时离焦量才与回波功率有一段正比关系;相同离焦量下,负离焦导

致的回波衰减程度比正离焦大得多<sup>[18]</sup>。2013年,武东生运用Collins衍射积分公式建立了“猫眼回波”能量分布模型,并通过实验证明了模型的正确性。后向回波能量由集中到分散再集中,形成周期性变化。在小离焦范围内,离焦量发生微变会导致回波空间能量分布剧变,但入射角增大反向回波密度不会发生明显变化<sup>[20]</sup>。2016年,张玉发建立了理论模型并数值分析了回波功率随探测距离、入射角度、发散角、能见度等因素的变化<sup>[33]</sup>。他认为,入射激光一般分为正入射和斜入射两种情况。

正入射条件下,离焦目标模型如图9所示。

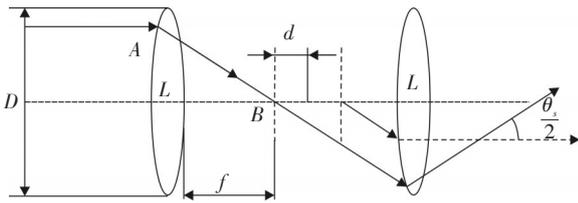


图9 正入射条件离焦目标模型

猫眼目标的有效面积如式1所示,离焦量产生的回波束散角如式2所示。

$$A_s = \frac{\pi f^2 D^2}{d(f+2d)^2} \quad (1)$$

$$\theta_s = 2 \tan^{-1} \left[ \frac{dD}{(f+d)^2} \right] \approx \frac{2dD}{f^2} \quad (2)$$

依据几何光学原理,从A处发射出的激光到达B处的光斑面积如式3所示,由B处目标镜头反射回的激光到达A处的光斑面积如式4所示。

$$S_s = \pi \left[ R \tan\left(\frac{\theta_s}{2}\right) \right]^2 \approx \frac{1}{2} \pi R \theta_s^2 \quad (3)$$

$$S_r = \pi \left[ \left( R + \frac{D/2}{\tan(\theta_s/2)} \right) \tan\left(\frac{\theta_s}{2}\right) \right]^2 \approx \pi \left[ \frac{RdD}{f^2} + \frac{D}{2} \right]^2 \quad (4)$$

式中,  $\theta_s$  表示发射激光的束散角,其余参数含义同前。

斜入射条件下,离焦目标模型如图10所示。

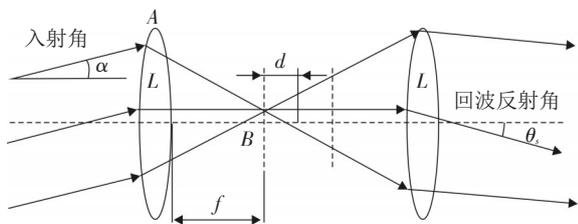


图10 斜入射条件离焦目标模型

入射的激光与光轴之间有一定的角度,光束经过透镜后其聚焦点可能在反射面外,导致反射光不能出射,所以光束的最大入射角  $\alpha_{\max}$  应满足式(5)所示。

$$\alpha_{\max} < \arctan\left(\frac{D}{2f}\right) \quad (5)$$

$$A_e = A_s \cos \alpha \quad (6)$$

$$P_{rs} = \frac{P_i \tau_i \tau_r \tau^2 \rho_s A_r A_e}{S_s S_r} \quad (7)$$

斜入射的照射面积如式(6)所示,A处 CCD 探测到的目标回波光功率如式(7)所示。式中,  $\tau_i$  表示激光发射系统的透射率;  $\tau_r$  表示探测系统光学镜头的透射率;  $\tau$  表示单程激光水平大气透过率;  $\tau^2$  表示双程激光水平大气透过率;  $\tau_s$  表示目标光学镜头透射率;  $\rho_s$  表示目标分化板的反射率;  $A_r$  表示 CCD 的面积。

### 2.3 关于“猫眼”回波传输距离的研究

由于大气的散射和吸收等因素,“猫眼回波”功率随着传输距离的增加而迅速衰减,所以传输距离就存在一个最大值。2009年,雷萍根据 Smith F G 的理论<sup>[34]</sup>建立了“猫眼回波”探测距离模型,并仿真计算出探测概率随距离变化曲线,如图11所示<sup>[35]</sup>。

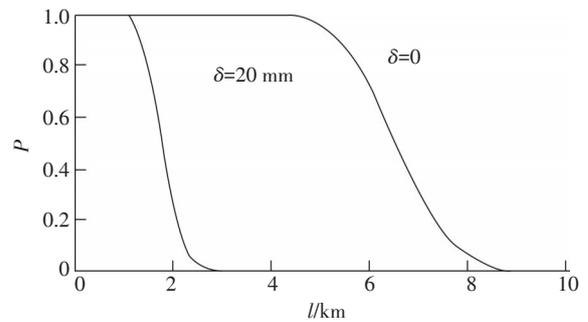


图11 探测概率随距离的变化趋势

2012年,孙华燕认为前人<sup>[36-37]</sup>给出的传输最大距离公式未充分考虑束宽和远场发散角等因素,因此对最大距离公式做出了修正,得出结论:基于“猫眼效应”的激光主动探测系统的最大作用距离与系统自身特性,“猫眼”目标参数,传输条件等因素有关<sup>[16]</sup>。2014年,李旭东建立数学模型分析了探测距离与通光孔径及反射面反射率的关系,如图12所示。

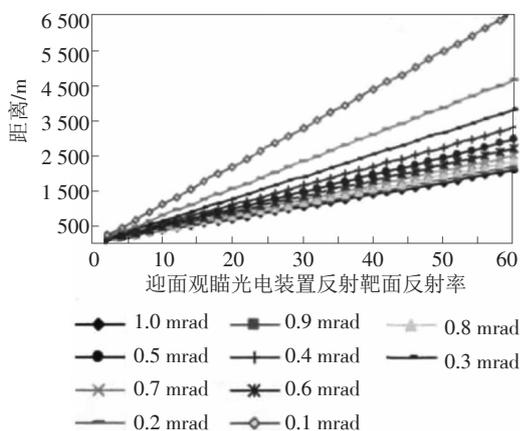


图12 探测距离与通光孔径数值模拟曲线

由图可以得出,反射面反射率越大,探测距离越远;通光孔径越大,探测距离越远。并用实验证明了建立的数学模型的正确性<sup>[38]</sup>。

## 2.4 “猫眼”探测的新方法

微弱激光“猫眼”回波信号的探测是远距离激光探测的难点。2006年熊飞提出了一种四象限法测量微弱光信号并通过实验验证了方法的可行性,原理如图13<sup>[39]</sup>。

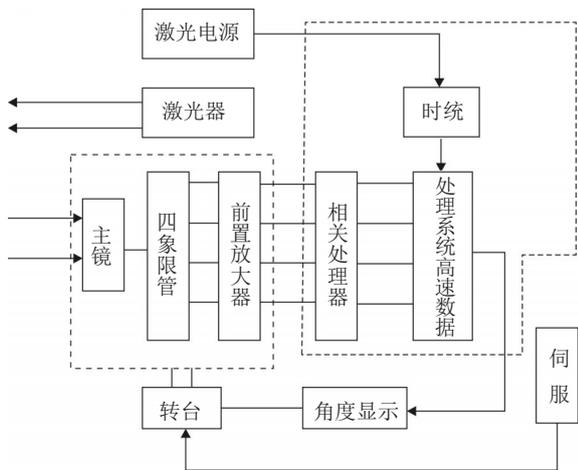


图13 四象限相关检测法原理图

该方法可以将回波信号与周围噪声信号显著地区分开来,大大提高系统的信噪比<sup>[39]</sup>。2013年,武东生提出了一种新型目标算法用以解决噪声背景下“猫眼效应”回波的动态成像探测与目标识别问题,并通过实验分析得出识别算法可以有效的抑制背景光信息,消除噪声对回波探测的影响<sup>[40]</sup>。

2015年杨名宇在背景差法<sup>[41]</sup>的基础上的设计了一个差分算法,并运用到光电窥视系统中,使得系统在复杂背景中依然可以检测到窥视设备<sup>[23]</sup>。

## 3 激光毁伤 CCD 的机理及对成像的影响

激光对 CCD 的损伤包括点损伤、线损伤和完全损伤,不同的损伤对成像质量的影响各不相同。因此需要对激光损伤 CCD 的原理和损伤后 CCD 成像的质量进行理论和实践的分析,以做到快速有效的损伤探测器。

### 3.1 被损伤 CCD 的成像变化

关于激光对 CCD 探测器的损伤,国外早在 20 世纪 70 年代就开始研究其损伤原理及应用了<sup>[42-43]</sup>。国内也开展了相关的工作<sup>[44-45]</sup>,2009 年沈洪斌通过 532 nm 脉冲激光器辐照 CCD 实验将 CCD 损伤分为 3 个阶段,如图 14。当入射激光能量密度较低时 CCD 成像会出现白色斑点,一段时间后斑点消失;如图 15。提高激光输入功率后 CCD 会出现纵向白线,一段时间后白线消失;如图 16。再次提高激光输入功率后,CCD 整个成像面均被损伤且不可恢复,失去成像功能<sup>[46]</sup>。

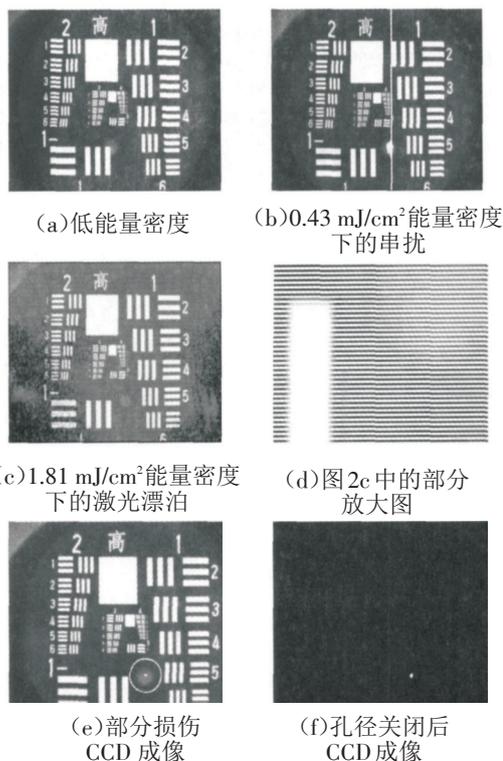


图14 脉冲激光辐照 CCD 成像(点损伤)

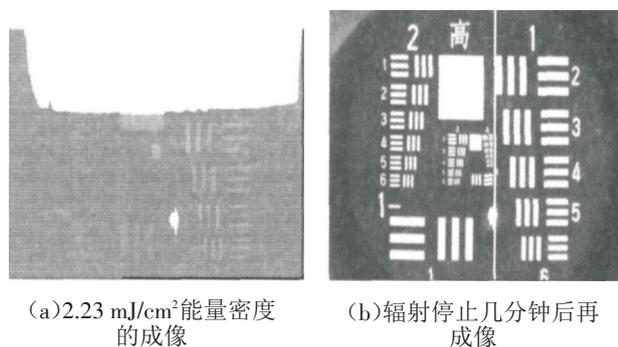


图15 脉冲激光辐照 CCD 成像(线损伤)

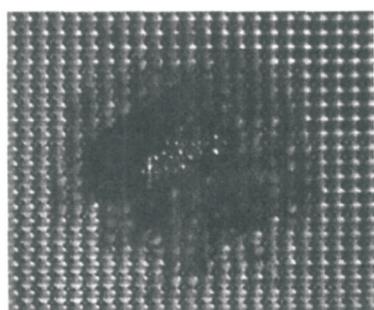


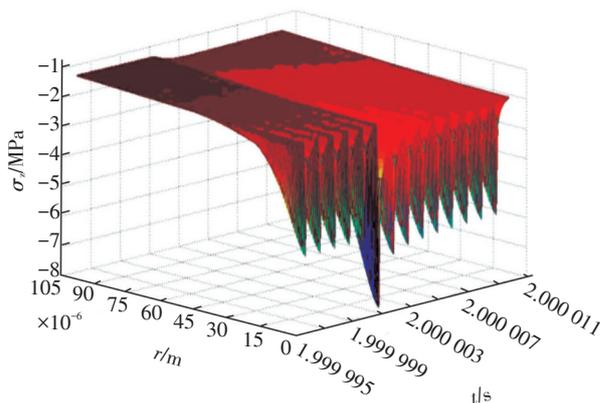
图16 完全失效后 CCD 像元的损伤形态(面损伤)

2012年,李刚将一高重频激光和一高功率的激光合束,通过实验测得了合束后的激光对 CCD 的损伤速率及损伤强度,得出结论:合束后的激光对 CCD 的损伤效果大大加强,远比单一激光的损伤效果要好得多<sup>[47]</sup>。2013年,朱志武采用同批次、同型号的 CCD 作为靶材进行损伤并分析了损伤机理,认为损伤分为3个阶段:轻微损伤(有白色损伤点)、严重损伤(有损伤线)以及完全失效(黑屏),并将严重损伤阶段分为了正常和非正常阶段<sup>[48]</sup>。

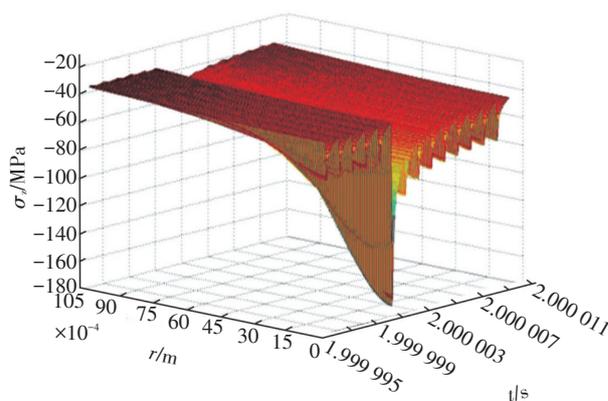
### 3.2 损伤机理的研究

损伤分为软损伤和硬损伤。软损伤是 CCD 短暂的运行失效,即损伤发生一段时间后 CCD 可以恢复,而硬损伤是对 CCD 永久性的损伤且无法恢复。究其原因,孙承伟认为在激光的辐照过程中,探测器材料的温度的升高会导致内部各器件的机构发生热形变,产生热应力和热应变,熔融甚至汽化烧蚀等现象<sup>[49]</sup>。2008年,姜楠建立了激光辐照 CCD 层状结构的热力耦合模型,并采用有限元法计算出了各层的温度分布,并推测了 CCD 损伤的直接原因。他认为微透镜首先被损伤完全后遮光铝膜开始出

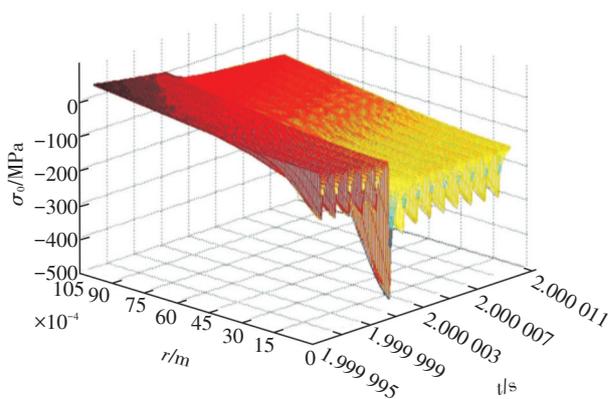
现损伤,从而导致光直接入射到垂直移位寄存器,产生漏光,从而出现白色损伤线。当损伤到达 Si 基底时,将导致时钟线的断裂,因此 CCD 将无法成像<sup>[50]</sup>。2009年,王祖军从粒子的角度提出了 CCD 损伤的机理。从粒子的角度看,CCD 受到激光辐照后主要有两种损伤形式,即电离辐射损伤和位移辐射损伤<sup>[51]</sup>。2012年, Li Gang<sup>[47]</sup>将一高重频激光和一高功率的激光合束后入射到 Al 膜,通过仿真模拟的方法计算出了热应力场随时间、径向距离变化的变化如图 17 所示。



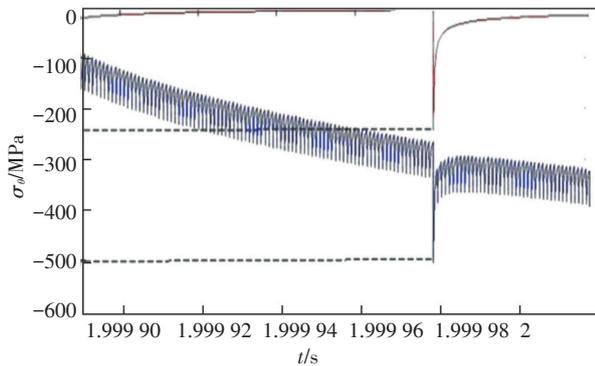
(a)组合激光辐照下 Al 膜轴向应力变化图



(b)组合激光辐照下 Al 膜径向应力变化图



(c)组合激光辐照下 Al 膜环向应力变化图



(d)组合激光、脉冲激光辐照下Al膜径向应力比较图

图17 组合激光照射Al膜的热应力变化

2013年,聂劲松建立了Nd:YAG激光辐照CCD的理论模型,并计算出CCD的温度和热应力场的分布,得出结论:随着激光辐照时间的增加,首先是热应力损伤使遮光铝膜和SiO<sub>2</sub>层分离而产生漏光,使得硅材料受到直接辐照而损伤严重<sup>[52]</sup>。Li Zewen在2015年使用毫秒激光器辐照CCD,从理论与实验的角度系统而全面的分析了热应力和温度的分布及对CCD各层结构的破坏顺序与机理。他认为CCD损伤的两大主因是Al膜的熔融和SiO<sub>2</sub>层的断裂<sup>[53]</sup>。Li Mingxin在后来的研究中对激光损伤CCD提供了补充,通过实验得到毫秒激光损伤CCD滤色层的顺序是绿、青、黄、品红色,损伤后滤色层已无着色<sup>[54]</sup>。

### 3.3 对损伤效果的研究

有文献[55-57]指出很多因素对激光损伤效果均有影响,如激光的能量密度、脉宽、重频、作用距离、脉冲数量等。在这方面的研究中,姜楠<sup>[50]</sup>通过仿真计算认为,当激光能量密度升高时,CCD探测器会更快的出现像元饱和,最高温度也会升高,对CCD损伤的更快更彻底。赵洋<sup>[58]</sup>和Li Mingxin<sup>[54]</sup>也用实验证明了姜楠的观点,且Li Mingxin实验得到脉冲数量越多,损伤区域最大温度及损伤面积大大增加的结论。2013年,李化<sup>[59]</sup>研究了不同激光脉宽条件下激光损伤阈值功率及辐照位置光斑尺寸大小,如图18,表1所示。

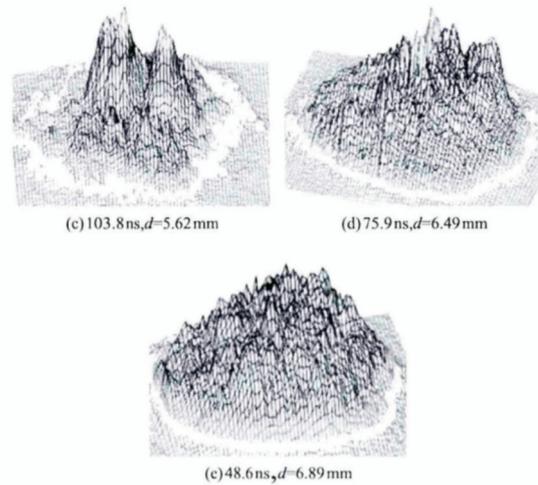
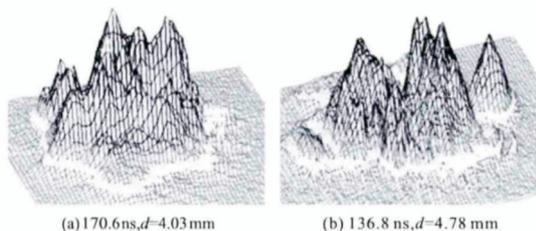


图18 不同脉宽条件下光斑的强度分布

表1 不同脉宽下的激光光斑半径

脉宽/ns	170.6	136.8	103.8	75.9	48.6
激光光斑半径/ $\mu\text{m}$	27.0	38.0	40.5	48.0	49.0

由图可以看出,脉宽越窄光斑强度越强,激光半径越大。同年,聂劲松<sup>[52]</sup>通过仿真计算得出,在平均功率密度一定的条件下,高重频激光比连续激光更容易造成CCD的损伤,且重频越低,损伤越容易。

### 4 利用“猫眼回波”探测激光损伤程度

本课题组研究激光损伤原理、损伤回波信息已有一段时日。已有的研究表明,已损伤CCD的成像图像与其损伤程度有对应关系<sup>[60-61]</sup>。雷鹏研究了光阑孔径的尺寸与猫眼回波波形的关系。如图19所示。

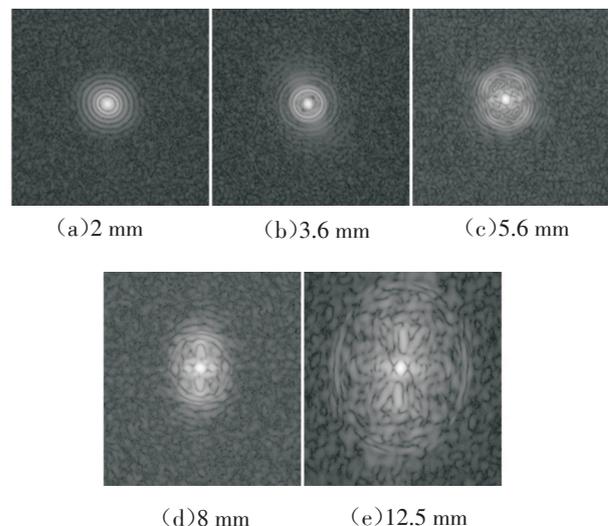


图19 不同光阑孔径回波图像的空间频谱

由图19可以看出,随着光阑孔径的增大,回波中有效频谱区域面积也在增大,同时高频信息也增加了很多,但杂乱无章的频谱信息也多了起来<sup>[62]</sup>。

雷鹏研究了激光对Si的损伤回波图样变化,分析了Si损伤不同的情况下回波图像的变化,并利用扫描电镜和光学显微镜对比了损伤区域内粒子的状态,如图20<sup>[63]</sup>所示。

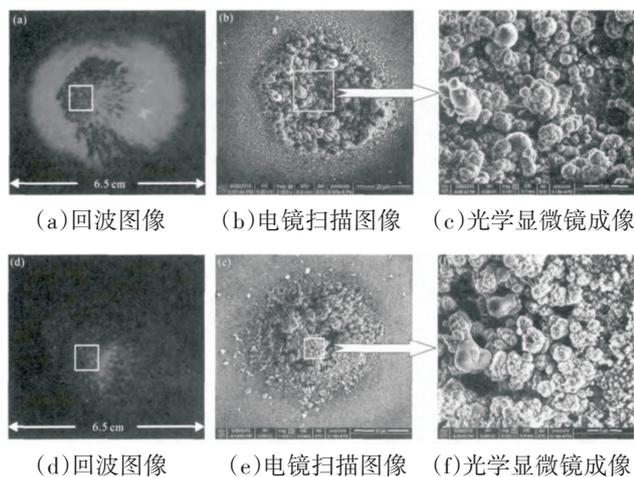


图20 细小光斑回波图像与不同小尺度颗粒损伤形貌

雷鹏还研究了回波图像随CMOS器件损伤的变化<sup>[64]</sup>。他通过实验观测了CMOS在不同激光功率辐照下的猫眼回波,如图21所示。

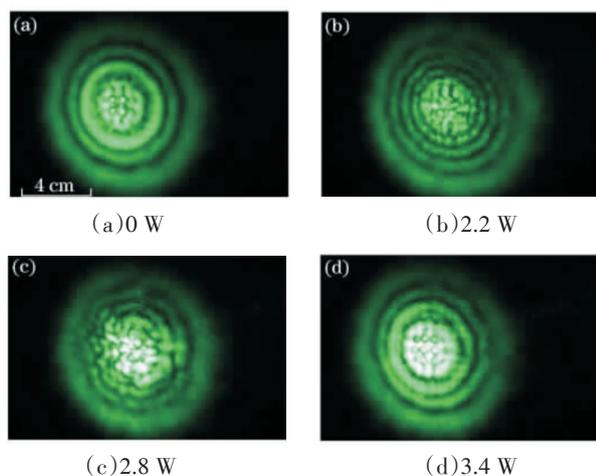


图21 CMOS在不同激光功率辐照下的猫眼回波

由图可见,随着辐照功率的增加,回波亮度增加,且阵列光斑先消失又出现。

## 5 结论

关于“猫眼回波”的研究大多围绕激光参数对回波强度的影响<sup>[28-39]</sup>,而仅有少数文献研究了“猫眼回波”光斑的横向分布<sup>[62-64]</sup>,且“猫眼回波”用于远距离探测激光对CCD损伤的研究仍未见报道。激光远距离辐照CCD时,无法测得CCD“猫眼回波”光斑的横向分布。此时需要测得损伤过程中的纵向分布,即时间特性,这是未来工作的重点。

## 参考文献

- [1] ZHANG Bo, NIU Yan-xiong, ZHANG Chu, et al. Analysis of influence factors for reflected wave power of 'cat-eye' target[J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(3): 420-423.
- [2] ZHOU Bin, LIU Bing-qi, WU Dong-sheng, et al. Research on echo energy of 'cat-eye' target based on laser's character of polarization[J]. International Conference on Electronics and Optoelectronics, 2011: 302-305.
- [3] 马浩洲. 目标反射特性与“猫眼”效应研究[J]. 激光技术, 2003, 27(6): 600-602.
- [4] 蒋治国, 谭吉春, 梁晶, 等. “猫眼”效应用于主动式激光侦察的适用条件分析[J]. 激光技术, 2005, 29(5): 549-551.
- [5] 葛成良, 黄志伟, 季云松, 等. 基于“猫眼”效应的目标识别[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(7): 632-634.
- [6] ZHAO Xun-jie, GAO Zhi-yun, ZHANG Ying-yuan. Technology of active laser reconnaissance and the application in the military[J]. Optical Technology Papers, 2009, 29: 415-417.
- [7] SHI Lan, WANG Hong. Foreign anti-sniper detection technology and equipment[J]. Electro-optic Technology Application, 2010, 25: 16-20.
- [8] Sniper Detection. The marine corps warfighting laboratory testing CILAS's SLD 500[J]. French Science and Technology Fortnightly, 2009: 6-7.
- [9] Novichkov N. Portable automatic device for optical and electronic countermeasures[J]. Arms Show News, 2005: 13-27.
- [10] Rabinovich W S, Goetz P G, Mahon R, et al. Performance of cat's eye modulating retro-reflectors for free-space optical communications[J]. Proc SPIE 5550, 2004: 104-114.
- [11] Peter G Goetz, William S Rabinovich, Steven C Binari,

- et al. High-performance chirped electrode design for cat's eye retro-reflector modulators[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 18, 2006: 2278-2280.
- [12] WU Dong-sheng, ZHANG Peng, HU Wen-gang, et al. Detection of cat-eye effect echo based on unit APD[J]. Proceedings of SPIE 10153, 2016: 1-10.
- [13] ZHANG Bo, ZHANG Chu, WU Dong-sheng, et al. Analysis of oblique incident angle on retro-reflected wave power in 'cat-eye' target[J]. Laser & Infrared, 2009, 39(10): 1046-1050.
- [14] LI Shuan-gang, CHENG Yu-bao. Theoretical analysis on echo power of active laser reconnaissance based on 'cat-eye' effect[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35: 80-83.
- [15] LEI Ping, XING Hui, XUE Ting, et al. Analysis of detection capability for active laser detection system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(6): 981-985.
- [16] 孙华燕, 赵延伸, 郑勇辉. 基于猫眼效应的激光主动探测技术研究与应用[J]. 装备学院学报, 2012, 23(6): 302-305.
- [17] ZHAO Yan-zhong, SUN Hua-yan, SONG Feng-hua, et al. Research on the mechanism of reflection characteristics of laser irradiation on cat eye optical lens[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(4): 2284-2294.
- [18] 和婷, 牛燕雄, 张鹏, 等. 离焦量对回波功率的影响的新解释[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(11): 2956-2960.
- [19] Hambling D. New sensor-blasting laser: blinding brilliance [EB/OL]. 2011-09.
- [20] 武东生, 白廷柱, 刘秉琦, 等. 光学窗口后向回波能量模型及特性研究[J]. 北京理工大学学报, 2013, 33(7): 722-78.
- [21] 时光, 张海洋, 耿仲博, 等. 大视场激光主动探测系统实验[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(4): 890-894.
- [22] Novichkov N. Portable automatic device for optical and electronic countermeasures[J]. Arms Show News, 2005, 13(1): 27.
- [23] 杨名宇. 利用激光主动探测技术实现光电窥视设备检测[J]. 中国光学, 2015, 8(2): 255-262.
- [24] 郭荣幸, 孙俊灵, 赵成, 等. 基于猫眼效应的激光主动探测技术研究[J]. 山东农业大学学报, 2016, 47(2): 278-282.
- [25] 卿光弼, 王学楷, 郭勇, 等. "猫眼效应"的物理模型及证明[J]. 激光技术, 1995, 19(4): 244-248.
- [26] 葛成良, 黄志伟, 季云松, 等. 基于"猫眼效应"的目标识别[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(7): 632-634.
- [27] 谷锁林, 孙华燕, 张永继, 等. 空中目标的激光主动探测[J]. 激光与红外, 2005, 35(7): 476-478.
- [28] 邵立, 焦洋, 孙中涛, 等. 一种对光学卫星精确定位的方法[J]. 电光与控制, 2007, 14(2): 96-100.
- [29] 周斌, 刘秉琦, 张瑜, 等. 利用 CCD 实现"猫眼"目标探测的实验研究[J]. 光电工程, 2011, 38(11): 35-38.
- [30] 蒋治国, 谭吉春, 梁晶, 等. "猫眼"效应用于主动式激光侦察的适用条件分析[J]. 激光技术, 2005, 29(5): 549-551.
- [31] 卞学丽. "猫眼"系统中离焦量的变化对回波功率的影响[J]. 中国测试技术, 2007, 33(2): 84-86.
- [32] 张博, 牛燕雄, 张维, 等. "猫眼"目标回波功率的影响因素分析[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(3): 420-423.
- [33] 张玉发, 孙晓泉. 激光主动探测影响因素分析[J]. 光电技术应用, 2016, 37(6): 882-885.
- [34] SMITH F G. Atmospheric Propagation of Radiation[M]. Bellingham: SPIE Optical Engineering, 1993.
- [35] 雷萍, 邢晖, 薛挺, 等. 激光主动探测系统的探测能力分析[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(6): 981-985.
- [36] SUN Hua-yan, XIONG Fei, GU Suo-lin. Ranging performance of active laser detection[J]. SPIE, 2006, 6344: 1-7.
- [37] 董小刚, 朱海军, 殷刚. 基于"猫眼效应"的激光主动侦查系统探测距离分析[J]. 激光与红外, 2011, 41(1): 67-70.
- [38] 李旭东, 米建军, 茹志兵, 等. 基于激光主动探测的"猫眼效应"研究[J]. 应用光学, 2014, 35(2): 342-347.
- [39] 熊飞, 孙华燕, 谷锁林. 一种激光主动探测的回波信号检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2006, 2(6): 1710-1712.
- [40] 武东生, 白廷柱, 刘秉琦, 等. 猫眼效应回波的动态成像探测与目标识别[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 1-6.
- [41] 闵永智, 党建武, 张振海. 图像式无砦轨道表面沉降在线监测系统[J]. 光学精密工程, 2013, 6(21): 1621-1627.
- [42] Bartoile F J, Esterowitz L, Kruer M R, et al. Thermal recovery processes in laser irradiated HgCdTe (PC) detectors[J]. Appl Opt, 1975, 14(10): 2499-2507.
- [43] Bartoile F J, Esterowitz L, Allen R, et al. A generalized thermal model for laser damage in infrared detectors[J]. Appl Phys, 1976, 47(10): 2875-2881.
- [44] 黄绍艳, 张永生, 唐本奇. 500 fs 超短脉冲激光对 CCD 探测器的破坏效应[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(10): 1445-1448.
- [45] 李文煜, 王金宝, 程湘爱. 激光对面阵 CCD 器件破坏的一种新机理[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(10): 1457-1460.
- [46] 沈洪斌, 沈学举, 周冰, 等. 532 nm 脉冲激光辐照 CCD 实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(10): 1449-1454.
- [47] LI Gang, SHEN Hong-bin, LI Li, et al. Laser-induced

- radar[J]. SPIE, 2004, 5412: 257-263.
- [8] 赵宝升,陈敏.采用多狭缝条纹管实现激光三维成像[J].光子学报,2004,33(12):1426-1427.
- [9] 朱虹.数字图像处理基础[M].北京:科学出版社,2005:121-124.
- [10] 徐大纶.变像管高速摄影[M].北京:科学出版社,1990:93-94.
- [11] 曾庆勇.微弱信号检测[M].杭州:浙江大学出版社,1996.
- 
- (上接第14页)
- damages to charge coupled device detector using a high-repetition-rate and high-peak-power laser[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 47: 221-227.
- [48] 朱志武,张震,程湘爱,等.单脉冲激光对CCD探测器的硬损伤及损伤概率[J].红外与激光工程,2013,42(1):113-118.
- [49] 孙承伟.激光辐照效应[M].北京:国防工业出版社,2002.
- [50] 姜楠,张维,牛燕雄,等.脉冲激光辐照CCD探测器的硬破坏效应数值模拟研究[J].激光与红外,2008,38(10):1004-1007.
- [51] 王祖军,唐本奇,肖志刚,等.CCD辐射损伤效应及加固技术研究进展[J].半导体光电,2009,30(6):797-803.
- [52] 聂劲松,王玺,李化,等.1.06  $\mu\text{m}$ 激光辐照CCD探测器的热力效应分析[J].红外与激光工程,2013,42(S2):380-386.
- [53] LI Ze-wen, WANG Xi, SHEN Zhong-hua, et al. Mechanisms for the millisecond laser-induced functional damage to silicon charge-coupled imaging sensors[J]. Applied Optics, 2015, 54(3): 378-384.
- [54] LI Ming-xin, JIN Guang-yong, TAN Yong. Functional degradation of CCD detector irradiated by millisecond pulse laser[J]. Optik, 2016, 26(16).
- [55] HUANG Shao-yan, ZHANG Yong-sheng, TANG Ben-qi, et al. Damage effect on CCD detector irradiated by 500 fs laser pulse[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(10): 1445-1448.
- [56] ZHANG Yu. Study of damaging effect on paneled CCD detectors irradiated locally by pulse laser[J]. M A Dissertation, 2011.
- [57] SHAO Jun-feng, LIU Yang, WANG Ting-feng, et al. Damage effect of charged coupled device with multiple-pulse picosecond laser[J]. Acta Armamentarii, 2014, 35(9): 1408-1413.
- [58] 赵洋,金光勇,李明欣,等.毫秒脉冲激光损伤CCD探测器的实验研究[J].激光技术,2017.
- [59] 李化,王玺,聂劲松,等.脉冲宽度对CCD探测器激光损伤效果的影响[J].红外与激光工程,2013,42(S2):403-406.
- [60] 郝向南,李化,聂劲松,等.不同工作状态激光对可见光CCD的损伤实验[J].光电工程,2012,39(9):113-118.
- [61] 邱冬冬,张震,王睿,等.脉冲激光对CCD成像器件的破坏机理研究[J].光学学报,2011,31(2):0214006.
- [62] 雷鹏,孙可,张玉发,等.凝视光电成像系统猫眼回波特性的理论与实验研究[J].光子学报,2016,45(6):1-7.
- [63] 雷鹏,孙可,张玉发,等.猫眼回波探测1.06  $\mu\text{m}$ 激光引发硅的损伤演化[J].红外与激光工程,2016,45(12):1-7.
- [64] 雷鹏,孙可,李化,等.猫眼回波图像随CMOS器件激光损伤变化的实验研究[J].中国激光,2016,43(6):1-7.
- 
- (上接第47页)
- [11] Yank S S, Kim S C, Ryou H S. An experimental study on the effect of longitudinal ventilation on the variation of burning rate in tunnel fires[J]. Tunnel and underground space, 2005, 36(6):569-596.
- [12] 冯军,蒋新生,翟淡,等.油品燃烧火焰光谱特性模拟实验研究[J].后勤工程学院学报,2016,32(1):23-28.
- [13] 敖文,杨卫娟,汪洋,等.气流速度对晶体硼颗粒热氧化及点火燃烧特性的影响[J].固体火箭技术,2013,36(4):511-515.
- [14] 张靖周.高等传热学[M].北京:科学出版社,2009.
- [15] 欧阳的华,陈昕,潘功配,等.氧差对烟火药光辐射强度的影响[J].火工品,2012,6(3):34-36.